

令和 2 年 7 月 6 日現在

機関番号：82706

研究種目：若手研究(A)

研究期間：2016～2019

課題番号：16H05883

研究課題名(和文) マルチ同位体指標によるヒマラヤ水系で起こる化学的風化作用の全容解明

研究課題名(英文) Chemical weathering of the Himalayan river system in Bangladesh: a multi-isotope approach

研究代表者

吉村 寿紘 (YOSHIMURA, Toshihiro)

国立研究開発法人海洋研究開発機構・海洋機能利用部門(生物地球化学プログラム)・研究員

研究者番号：90710070

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 19,000,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では世界で最も風化作用が活発なヒマラヤ水系の最下流部の河川水と地下水を調査対象として、Sr、Li、Mg、Ca、O、Hなどの同位体組成を測定し、低地に堆積したヒマラヤ山脈に由来する堆積物においても化学風化が活発に進行しており、剝削が活発な上流部と同様の反応様式であることを示した。河川の各同位体組成は季節変化を示さず、反応が定常状態にある。また地下水深部ではより堆積物のバルク溶解反応が進行する。ベンガル平野の風化様式は気候変動で気温・降雨量が変化した時に溶質フラックスが大きく変化するため、気候変動に対する化学風化のフィードバックを予測するうえで重要である。

研究成果の学術的意義や社会的意義

ベンガル平野の河川水と地下水の同位体組成から、その溶質が上流の高山地帯から由来するものではなく、多くは降雨と堆積物が反応することでもたらされたことが判明した。50m以深の地下水では化学組成がケイ酸塩鉱物の溶解反応の影響を多く受ける。本研究地域から海洋にもたらされる各種元素の同位体フラックスは非常に大きいため、長期的な海水の同位体組成に影響を及ぼす。地下水の同位体組成の平均値はガンジス・ブラマプトラ川の平均値と誤差の範囲で一致することから、化学風化が上流部と下流部で一致する定常状態にあることを示した。風化の気候影響を知る上で重要な知見である。

研究成果の概要(英文)：This study investigated spatial isotopic variations of Sr, Li, Mg, Ca, O and H in dry- and wet-season river waters from the Ganges, Brahmaputra, and Meghna river system and groundwater in the Bengal Plain, Bangladesh. The sediment load in low-altitude plains is derived from rapid denudation of high mountains, where physical erosion rate is high and hence material is incompletely weathered (i.e., weathering-limited regime). The river samples collected in dry and wet seasons were within the analytical error of our analyses, thus indicating that relative inputs from the distinct the sources were effectively the same at a given sampling site. For the Bengal Plain, chemical weathering at greater sediment depths is more congruent. The Himalayan-derived material continue to be actively weathered during their transit through the floodplain, which is an important knowledge for climate-weathering feedback.

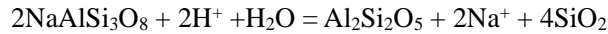
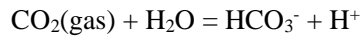
研究分野：地球化学

キーワード：化学風化 ヒマラヤ 同位体

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

地球の気候を決定する重要な因子として大気二酸化炭素 (CO₂) 濃度が挙げられ、人為起源の温暖化は社会的にも注目が集まっている。大気 CO₂ は地球表層の水に溶存し、それに続くケイ酸塩岩の溶解と変質反応によって数万年の時間スケールで中和される(例: 曹長石のカオリナイト化):



これは岩石の化学風化として知られ、温室効果ガスである大気 CO₂ が地球表層システムから除去されるため気候の寒冷化に寄与する。すなわち長期的な大気 CO₂ 濃度の自然変動を規定する制御因子は陸域の化学風化作用で、岩石が溶解する過程で大気 CO₂ の多くが溶存種の炭酸水素イオンとなり、その結果として陸水のアルカリ度と pH は増加し、最終的には海に注ぐ。その後、炭素は海洋で有機炭素や炭酸カルシウムとして地層中に固定される。人為起源の二酸化炭素の過剰排出に警鐘が寄せられる近年において気候と炭素循環の関係は大きな注目を集めており、気候の調整を担う岩石の風化反応の重要性が高まっている。

大陸地殻の風化様式は下記の 2 つのレジームに大別される:

(1) 輸送制限型 (transport-limited): 岩石の侵食や剥離が遅い場合は化学風化が十分進行する。このため被風化物質の供給が岩石風化の総量ならびに海洋への溶質供給量が制限される。このレジームは低平な地形で滞留時間が長くなることで達成される。

(2) 風化制限型 (weathering-limited): 隆起が活発で侵食が早い場合には岩石の新鮮面の露出速度に対して化学風化速度が間に合わないため、岩石の化学変質は十分進行しない。造山運動などの隆起が活発に行われている場合がこれに該当する。代表例がヒマラヤ-チベットの造山帯で、高度が高く氷河による削剥が活発で、また地すべりが多く発生するため下流への堆積負荷が大きい。活発な削剥場から供給される碎屑粒子の溶解・化学風化は氾濫原の堆積後に起こるため、下流への化学フラックスに大きな影響を与える。実際にヒマラヤ山脈の碎屑粒子からなる氾濫原では、上流の山地に由来する河川の化学フラックスに対しておよそ 50% 以上の寄与が見積もられている (Lupker et al., 2012; Bickle et al., 2018)。

陸水 (河川水と地下水) に溶け込んだ各種元素はその移動中に様々な反応系に取り込まれ、かつリサイクルされながら化学組成にその反応履歴を刻む。地球表層の気候・環境に大きく影響を与える化学風化の反応系は複雑であるため元素の挙動は各論的に扱う必要がある。2000 年代以降、質量分析装置の高度化に伴って従来よりも一桁高い精度の同位体比の変化を観測できるようになった。この“次世代同位体”は指標性が極めて高く、各元素サイクルに関連した現象の復元指標として有用である。マルチ同位体を駆使した次世代の同位体陸水環境学によって、集水域で起こるケイ酸塩岩、炭酸塩岩それぞれの風化反応に影響する因子を特定することが期待される。

2. 研究の目的

本研究では世界でも最も風化作用が活発なヒマラヤ水系の最下流部のベンガル平野で採取された河川水と地下水を調査対象として、先端の同位体指標によって大気 CO₂ 増加に対して負のフィードバックをもつ化学風化反応の様式を明らかにすることを目的とする。そのために岩石の主要構成金属元素の安定同位体比に着目し、各元素の安定同位体比からケイ酸塩風化、炭酸塩風化、二次鉱物の生成など陸域で起こる化学風化作用の履歴を読み解く。化学風化反応の進行度やベンガル平野内の地下水の化学組成の変化に寄与する因子を特定する。また地球表層の元素循環に係る生物地球化学過程における各種元素の同位体分別を

制約する。

また、複数元素の同位体分析を実現するために迅速かつ簡便な前処理手法の開発が必要である。金属元素の同位体分析ではイオン交換樹脂やキレート樹脂を用いた手作業による分離操作が確立されているが、地質試料は多様な有機・無機化合物が混在しているため複雑な分離操作を伴う。単一の試料から複数元素を同時分離する自動化手法は確立されておらず、イオンクロによる同位体測定の前処理法を実現することを目的とする。

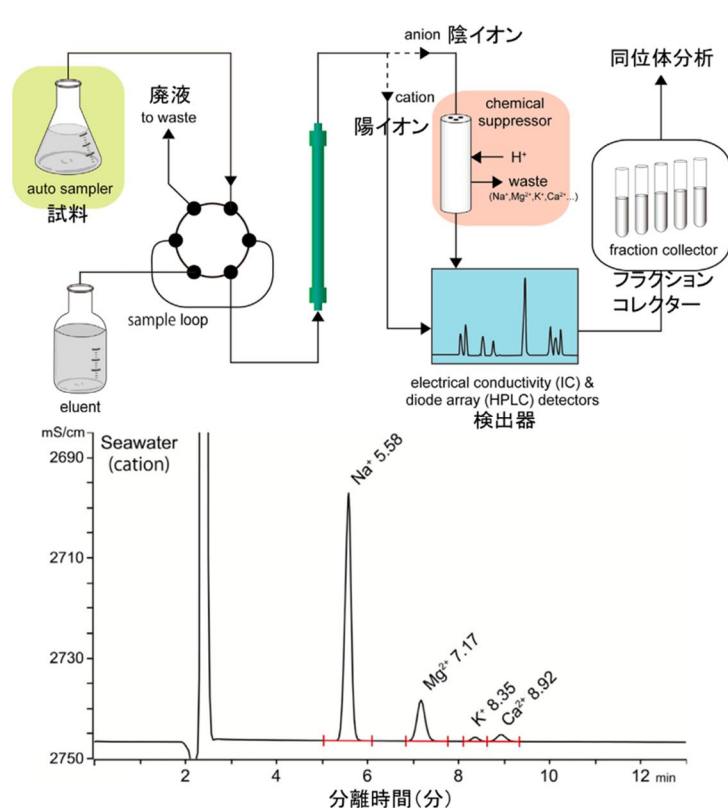
3. 研究の方法

本研究ではベンガル平野で採取されたガンジス川・ブラマプトラ川・メグナ川の河川水ならびにベンガル平野の地下水の同位体組成から、化学風化の時間変化と面変化を明らかにする。試料は2012年の乾期と雨期(2月・9月)に実施した採水調査によって得られたものを用いた。同位体測定には目的元素を100%の回収率で単離精製する必要がある。有機地球化学分野では、多様な夾雑物を含む地質試料から超微量の有機分子を単離し同位体測定する手法として分取装置を備えた高速液体クロマトグラフィー装置が用いられており、化合物レベルの高度な分取と精製が可能である。同様に金属イオンにおいてもイオンクロマトグラフィー(IC)に分取装置を外部接続することで迅速かつ高純度の単離精製を自動で行うことが可能となり、試料の処理速度の大幅な向上が期待される。

4. 研究成果

(1) 河川水と堆積物試料に応用可能な同位体前処理手法の開発

イオンクロマトグラフ(Ion Chromatograph, IC)と液体クロマトグラフ分取装置(Fraction Collector, FC)を導入し、両者をオンライン接続する新手法(IC-FC法)を開発した。前者のイ



オン交換モードの分離を用いることで水試料に含まれる陽イオンを一括自動分離できる。従来手法では一日で10試料程度の検体数しか行えなかったが、1試料につき最短10分で分離が完了する画期的な成果である。純度の逐次モニタリングが可能となり、さらに分離度の向上によって、高精度の同位体比測定を実現した。Liなど極微量元素の測定に適用も可能で、世界初の成果である。また、河川水の溶質の供給源は陸域の岩石であり、河川水や地下水に含まれる金属元素の供給源となる。多様な岩石種に対応するアルカリ溶融分解法とIC-FCを組み合わせることで、ケイ酸塩、炭酸塩などあらゆる試料に対応する前処理手法も合わせて確立した(図1)。

図1. イオンクロマトグラフ(Metrohm IC 930)と高速液体クロマトグラフ(Agilent 1260 Infinity-II)による同位体自動前処理システム(上)と水試料の分離例(下)。

(2) ベンガル平野およびヒマラヤ水系の河川水と地下水

ベンガル平野にて採取した陸水試料の酸素・水素同位体比、陽イオン組成、Sr/Ca、Sr 同位体比ならびにリチウム、マグネシウム、カルシウム、ストロンチウムの各種安定同位体比から、風化の様式について以下の a~d の 4 点を明らかにした。(a)ベンガル平野の地下水の同位体組成から、その溶質が上流の高山地帯からに由来するものではなく、多くは降雨と堆積物の反応でもたらされた。(b)50m よりも深い地下水は数千年以上の滞留時間を有するが、その化学組成がケイ酸塩鉱物の溶解反応の影響を多く受ける(図2)。(c)長い滞留時間を経た地下水は固相(岩石/鉱物)と液相(溶存態)の同位体がより近くなるため、相合な風化反応(congruent weathering)が進行する。(d)地下水の同位体組成の平均値はガンジス・ブラマプトラ川の平均値と誤差の範囲で一致することから、化学反応は河川水もベンガル平野内の地下水も定常状態にある。これは平野部は滞留時間が長い化学風化が完全に進行しており、活発な岩石の削剥が起こる高山地帯とは反対の様式であるとする従来の説を支持せず、高度が低い氾濫原においても削剥が活発な上流部と同様に化学反応が溶質の供給量を制限するタイプの風化が進行することを示唆する。このような風化様式は気候変動で気温・降雨量が変化した時に溶質フラックスが影響を受ける。温暖湿潤な気候下で上流部の削剥が進む場合、氾濫原が拡大し溶質の供給量が増加するため、気候変動に対して負のフィードバックをもつ可能性がある。

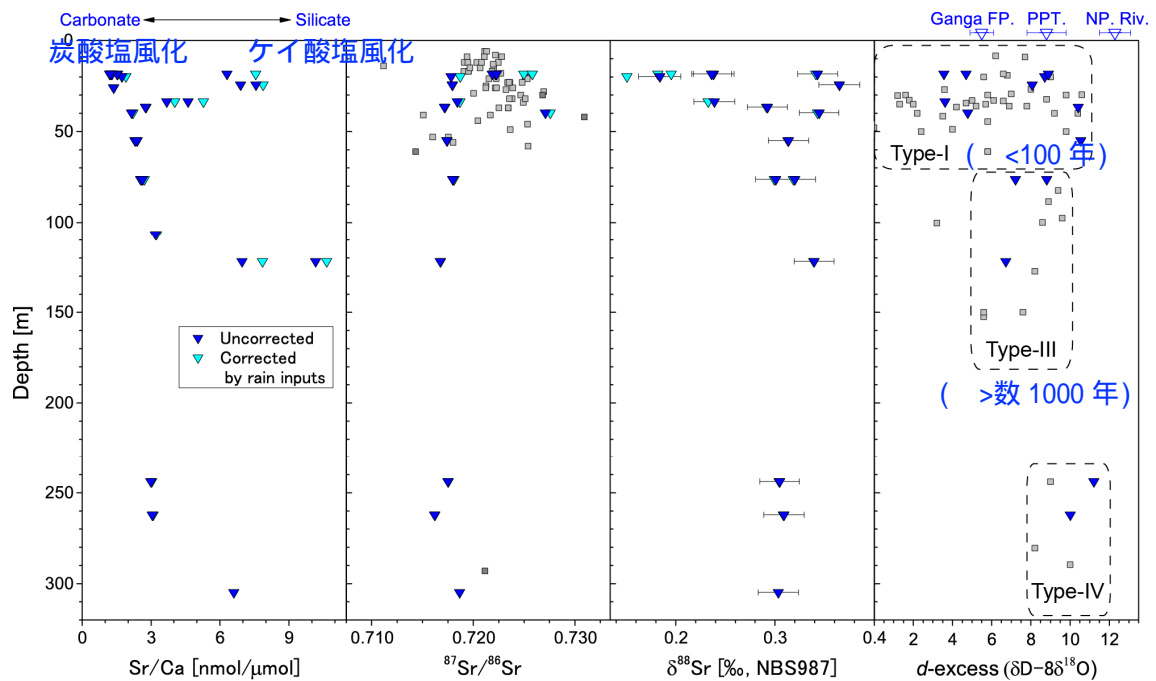


図2. ベンガル平野の地下水の Sr/Ca 比、放射壊変起源の Sr 同位体比 ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$)、Sr 安定同位体比 ($\delta^{88}\text{Sr}$)、水素・酸素同位体比の d-excess 指標。地下の浅部は滞留時間()が短く化学組成の不均質性が顕著で風化反応のばらつきが大きい、深部では各同位体指標が岩石の化学組成に近づく。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計8件（うち査読付論文 8件/うち国際共著 4件/うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 Araoka, D. and Yoshimura, T.	4. 巻 18P509
2. 論文標題 Rapid purification of alkali and alkaline-earth elements for isotope analysis (^7Li , ^{26}Mg , $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$, and ^{88}Sr) of rock samples using borate fusion followed by ion chromatography with a fraction collector system.	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Analytical Sciences	6. 最初と最後の頁 1-25
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2116/analsci.18P509	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Manaka, T., Zakir, H., Yoshimura, T., Suzuki, A. and Kawahata, H.	4. 巻 75
2. 論文標題 Monthly change of pCO ₂ in the Ganges River: implications for carbon release from soil to the atmosphere via inland waters	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of Agricultural Meteorology	6. 最初と最後の頁 47-55
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2480/agrmet.D-18-00007	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する
1. 著者名 Kawahata H., Fujita K., Iguchi A., Inoue M., Iwasaki S., Kuroyanagi A., Maeda A., Manaka T., Moriya K., Takagi H., Toyofuku T., Yoshimura T., Suzuki A.	4. 巻 6
2. 論文標題 Perspective on the response of marine calcifiers to global warming and ocean acidification? Behavior of corals and foraminifera in a high CO ₂ world "hot house"	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Progress in Earth and Planetary Science	6. 最初と最後の頁 1-37
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1186/s40645-018-0239-9	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -
1. 著者名 Isaji Y., Kawahata H., Ogawa N. O., Kuroda J., Yoshimura T., Jimenez-Espejo F. J., Makabe A., Shibuya T., Lugli S., Santulli A., Manzi V., Roveri M., Ohkouchi N.	4. 巻 9
2. 論文標題 Efficient recycling of nutrients in modern and past hypersaline environments	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Scientific Reports	6. 最初と最後の頁 1-12
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41598-019-40174-9	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 吉村 寿紘	4. 巻 52
2. 論文標題 地球表層の主要陽イオンと炭酸塩の物質循環	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 地球化学	6. 最初と最後の頁 131-142
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.14934/chikyukagaku.52.131	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Yoshimura Toshihiro, Araoka Daisuke, Tamenori Yusuke, Kuroda Junichiro, Kawahata Hodaka, Ohkouchi Naohiko	4. 巻 1531
2. 論文標題 Lithium, magnesium and sulfur purification from seawater using an ion chromatograph with a fraction collector system for stable isotope measurements	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Journal of Chromatography A	6. 最初と最後の頁 157 ~ 162
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.chroma.2017.11.052	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Manaka Takuya, Araoka Daisuke, Yoshimura Toshihiro, Hossain Zakir, Suzuki Atsushi, Nishio Yoshiro, Kawahata Hodaka	4. 巻 18
2. 論文標題 Temporal and downstream changes of lithium isotope ratios along the river flow in Himalaya	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Geochemistry Geophysics Geosystems	6. 最初と最後の頁 3003 ~ 3015
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/2016GC006738	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Yoshimura, T., Tamenori, Y., Suzuki, A., Kawahata, H., Iwasaki, N., Hasegawa, H., Nguyen, T.L., Kuroyanagi, A., Yamazaki, T., Kuroda, J. and Ohkouchi, N.	4. 巻 202
2. 論文標題 Altrivalent substitution of sodium for calcium in biogenic calcite and aragonite	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Geochimica et Cosmochimica Acta	6. 最初と最後の頁 21-38
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.gca.2016.12.003	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

〔学会発表〕 計17件（うち招待講演 4件 / うち国際学会 7件）

1. 発表者名 吉村 寿紘, 荒岡 大輔, 黒田 潤一郎, 伊左治 雄太, 川幡 穂高, 大河内 直彦
2. 発表標題 海水の蒸発に伴う主成分イオンの濃度変化とMg同位体比による地中海蒸発イベントの濃縮過程の復元
3. 学会等名 日本地球化学会第65回年会（招待講演）
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 吉村 寿紘, 若木 重行, 黒田 潤一郎, 山崎 俊嗣, 井口 亮, 高木 悠花, 木元 克典, 櫻本 晋洋, 大河内 直彦
2. 発表標題 88Srによる第四紀の化学風化と海洋の炭酸塩収支の復元
3. 学会等名 第四回地球環境史学会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 吉村 寿紘, 荒岡 大輔, 黒田 潤一郎, 伊左治 雄太, Jimenez-Espejo Francisco, Lugli Stefano, Manzi Vinicio, Roveri Marco, 大河内 直彦
2. 発表標題 地中海メッシニアン期塩分危機に形成された蒸発岩のマグネシウム同位体組成
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合2018年大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Toshihiro YOSHIMURA, Daisuke ARAOKA, Yusuke TAMENORI, Junichiro KURODA, Hodaka KAWAHATA, Naohiko OHKOUCHI
2. 発表標題 Li, Mg, and S Purification from Seawater Using an Ion Chromatograph with a Fraction Collector System for Stable Isotope Measurements
3. 学会等名 15th Annual Meeting of Aisa Oceania Geosciences Society (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 若木重行, 吉村寿紘, 高柳栄子, 若木仁美
2. 発表標題 第四紀Sr同位体層序の精密化を目的とした放射起源Sr同位体比の超高精度分析
3. 学会等名 2018年度 日本地球化学会年会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 前田 歩, 吉村 寿紘, 荒岡 大輔, 鈴木 淳, 藤田 和彦, 大河内 直彦, 川幡 穂高
2. 発表標題 サンゴ礁棲大型定性有孔虫の無性生殖個体から得たMg同位体比の評価
3. 学会等名 第四回地球環境史学会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Shigeyuki Wakaki, Toshihiro Yoshimura, Hideko Takayanagi, Hitomi Wakaki
2. 発表標題 High precision radiogenic Sr isotope analysis by TIMS - error sources and limitations
3. 学会等名 3rd Korea-Japan Joint Meeting on Isotope-Ratio Mass spectrometry (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Eom Jiwon, Daisuke Araoka, Toshihiro Yoshimura, Toshitaka Gamo, Hodaka Kawahata
2. 発表標題 Mg isotopic composition of submarine vent fluids from arc and back-arc hydrothermal systems in the western Pacific
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合2018年大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 荒岡 大輔, 吉村 寿紘, 星野 美保子, 昆 慶明, 児玉 信介, Simandl George, Paradis Suzanne, Green Craig
2. 発表標題 炭酸塩胚胎レアアース鉱床のマグネシウム同位体比は何を記録しているか?
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合2018年大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 前田 歩, 吉村 寿紘, 荒岡 大輔, 鈴木 淳, 為則 雄祐, 藤田 和彦, 豊福 高志, 大河内 直彦, 川幡 穂高
2. 発表標題 大型底生有孔虫のMg同位体比と代替指標としての可能性
3. 学会等名 日本古生物学会第168回例会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Ayumi Maeda, Toshihiro Yoshimura, Daisuke Araoka, Atsushi Suzuki, Kazuhiko Fujita, Takashi Toyofuku, Naohiko Ohkouchi, Hodaka Kawahata
2. 発表標題 Investigation of ^{26}Mg in large benthic foraminifera as a temperature proxy
3. 学会等名 JpGU-AGU Joint Meeting 2017 (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 吉村 寿紘, 若木 重行, 黒田潤一郎, 石川 剛志, 大河内 直彦
2. 発表標題 ストロンチウム安定同位体比から探る第四紀の化学風化と海洋の炭酸塩収支の変化
3. 学会等名 日本地球化学会第64回年会 (招待講演)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 吉村 寿紘
2. 発表標題 海から見える地球表層の元素サイクル
3. 学会等名 第12回日本地球化学会ショートコース(招待講演)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Yoshimura, T., Wakaki, S., Kuroda, J., Yamazaki, T., Iwasaki, S., Takagi, H., Kimoto, K., Sakuramoto, Y., Ishikawa, T. and Ohkouchi, N.
2. 発表標題 A change in the net carbonate input during the Quaternary deduced from the 88Sr/86Sr record
3. 学会等名 ASLO 2017 Ocean Sciences Meeting (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Isaji, Y., Yoshimura, T., Araoka, D., Kuroda, J., Ogawa, N. O., Takano, Y., Jimenez-Espejo, F. J., Makabe, A., Suzuki, A., Shibuya, T., Lugli, S., Santulli, A., Manzi, V., Roveri, M., Kawahata, H. and Ohkouchi, N.
2. 発表標題 26Mg of the chloropigments from oxygenic and anoxygenic phototrophic bacteria inside benthic microbial mat of the Trapani solar salterns (Italy)
3. 学会等名 ASLO 2017 Ocean Sciences Meeting (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Yoshimura, T., Wakaki, S., Kuroda, J., Yamazaki, T., Iwasaki, S., Takagi, H., Kimoto, K., Sakuramoto, Y., Ishikawa, T. and Ohkouchi, N.
2. 発表標題 A Quaternary 88Sr/86Sr record from planktonic foraminifera of Equatorial Pacific sediment
3. 学会等名 Goldschmidt 2016 (国際学会)
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 Yoshimura, T.
2. 発表標題 Purification of alkali and alkaline-earth elements from environmental and biological samples using an ion chromatograph with a fraction collector system for stable isotope measurements
3. 学会等名 3rd Global User Meeting Ion Chromatography (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
--	---------------------------	-----------------------	----